PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Periocidad trimestral, Volumen 1, Numero 4, Años (2023), Pag. 16-46

Recibido: 2023-10-20
Aceptado: 2023-11-22
Publicado: 2023-12-22

Creación de Empaques Ecológicos a partir de Residuos de Cacao: Desarrollo de envoltorios biodegradables hechos con harina de cascarilla de cacao (*Theobroma cacao L.*) para uso en el sector productivo artesanal

Creation of Ecological Packaging from Cocoa Waste: Development of biodegradable packaging made from cocoa husk flour (Theobroma cacao L.) for use in the handicraft production sector

Autores

Núñez Rodríguez Pablo Juan
Universidad Estatal de Milagro
Ecuador – Milagro
pnunezr5@unemi.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-5293-1320

Mayra Paola Chifla Villón
Universidad Estatal de Milagro
Ecuador – Milagro
mchiflav1@unemi.edu.ec
https://orcid.org/0009-0009-8665-8666

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Resumen

El presente proyecto de investigación tiene como finalidad el desarrollo de empaques biodegradables a partir de harina de cascarilla de cacao (Theobroma cacao L.), un subproducto agrícola generado en grandes cantidades por la industria cacaotera. Esta propuesta surge como una alternativa sostenible frente a la problemática ambiental asociada al uso masivo de materiales plásticos no biodegradables, especialmente en el sector productivo artesanal, donde se requiere el uso constante de envases para la comercialización de productos.

El estudio contempla la caracterización físico-química de la cascarilla de cacao, su transformación en harina y la formulación de biopolímeros mediante procesos de mezclado, moldeado y secado. Se evalúan propiedades como la resistencia mecánica, la permeabilidad, la biodegradabilidad y la adaptabilidad del empaque a distintos tipos de productos artesanales. Asimismo, se analiza la viabilidad económica y la escalabilidad de la propuesta en comunidades productoras de cacao, fomentando el aprovechamiento integral de los residuos agrícolas y la generación de valor agregado local.

La investigación se enmarca en los principios de la economía circular y la innovación ambiental, promoviendo prácticas sostenibles que aporten al desarrollo de soluciones ecológicas y funcionales para pequeñas y medianas unidades de producción. Esta iniciativa representa un aporte significativo tanto en el ámbito ambiental como en el fortalecimiento del sector artesanal mediante tecnologías accesibles y de bajo impacto ambiental.

Palabras clave: empaque biodegradable, cacao, ambiente, sustentabilidad.

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Abstract

This research project aims to develop biodegradable packaging made from cocoa husk flour (Theobroma cacao L.), an agricultural by-product generated in large quantities by the cocoa industry. This proposal arises as a sustainable alternative to the environmental problems associated with the massive use of non-biodegradable plastic materials, especially in the artisan productive sector, where packaging is constantly required for product commercialization.

The study involves the physicochemical characterization of the cocoa husk, its transformation into flour, and the formulation of biopolymers through mixing, molding, and drying processes. Properties such as mechanical resistance, permeability, biodegradability, and the adaptability of the packaging to different types of artisan products are evaluated. In addition, the economic feasibility and scalability of the proposal in cocoa-producing communities are analyzed, encouraging the integral use of agricultural waste and the generation of local added value.

The research is framed within the principles of circular economy and environmental innovation, promoting sustainable practices that contribute to the development of ecological and functional solutions for small and medium-sized production units. This initiative represents a significant contribution both to the environmental field and to the strengthening of the artisan sector through accessible and low-impact technologies.

Keywords: biodegradable packaging, cocoa, environment, sustainability.

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Introducción

Con el transcurso de los años, el plástico se ha convertido en un material indispensable para la vida cotidiana del ser humano, debido a su versatilidad y bajo costo, lo que lo hace ideal para una amplia gama de aplicaciones industriales y de consumo inmediato. Sin embargo, su uso excesivo ha generado serios problemas ambientales, ya que sus estructuras son altamente resistentes a la degradación natural, lo que contribuye a la acumulación de residuos y a la contaminación ambiental.

El reciclaje se ha planteado como una alternativa para reducir el impacto ambiental del plástico; no obstante, este proceso no siempre garantiza condiciones adecuadas de higiene y seguridad para los seres vivos (Sanmartín et al., 2017) La mayoría de los polímeros sintéticos utilizados en la industria provienen de fuentes fósiles no renovables como el petróleo y el carbón, y se emplean ampliamente en la fabricación de empaques. En el año 2019, se estimó que se generaron aproximadamente 4 millones de toneladas de residuos plásticos, de los cuales solo el 25 % fue reciclado.

En respuesta a esta problemática, se han desarrollado plásticos biodegradables, diseñados para ser degradados por la acción de microorganismos que los utilizan como fuente de carbono. Estos biopolímeros pueden ser elaborados a partir de materias primas renovables como el plátano, la yuca, la celulosa, las legumbres y el cacao, debido a su contenido de ácido láctico, lo cual favorece su descomposición mediante la acción de microorganismos aerobios (Segura et al., 2020)

En el contexto ecuatoriano, el problema es particularmente grave: se estima que anualmente se generan más de 531.461 toneladas de residuos plásticos, una cantidad equivalente al peso de aproximadamente 350.000 automóviles medianos (Morán, 2020).

Ante esta situación, el presente estudio propone la obtención de empaques biodegradables a partir de residuos de cacao (*Theobroma cacao L.*), específicamente orientados a su aplicación en la industria de la confitería, como en la elaboración de productos de chocolatería y bombonería fina de consumo inmediato. Esta iniciativa busca contribuir a la reducción de contaminantes y ofrecer un producto final con un ciclo de vida más corto y que sea sostenible con el medio ambiente.

Material y métodos

Material

Insumos, materiales, reactivos y equipos

Insumos

- Harina de cascarilla de cacao

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Reactivos

- Glicerina o Glicerol (GLY)
- Agua (H_2O)
- Carboximetilcelulosa
- Vinagre (CH_3COOH)

Equipos

- Mufla
- Secador
- Molino abierto
- Cronómetro
- Plancha de calentamiento
- Mortero
- Horno

Materiales

- Malla de granulometría de 0.2 mm
- Bandeja de aluminio
- Matraz
- Pipeta
- Bureta
- Pinzas
- Termómetro
- Moldes.

Métodos

Diseño Metodológico

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

- **Tipo de investigación**

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo principal el diseño de empaques biodegradables a partir de harina de cascarilla de cacao (Theobroma cacao L.) para su aplicación en el sector alimentario artesanal. La investigación se estructuró en dos fases metodológicas complementarias:

1. **Fase exploratorio-descriptiva:** Se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura científica, centrada en estudios experimentales y ensayos controlados aleatorios, con el fin de analizar antecedentes, enfoques metodológicos y resultados relevantes en la elaboración de biopolímeros a partir de residuos agroindustriales. Esta fase permitió sustentar teóricamente la viabilidad del uso de la cascarilla de cacao como materia prima para la elaboración de empaques biodegradables (Snyder, 2019)

2. **Fase experimental:** En esta etapa se procedió al diseño y ejecución del proceso de fabricación de los empaques, utilizando harina de cascarilla de cacao como componente base. Se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas del producto final, tales como resistencia, flexibilidad y biodegradabilidad. Además, se aplicaron métodos estadísticos para validar los resultados experimentales y determinar la formulación más eficiente en términos de desempeño técnico y sostenibilidad ambiental.

Diseño de investigación

El diseño de la investigación se fundamentó en la sistematización de variables experimentales y en el uso del software estadístico Design Expert® versión 11, que permitió establecer un modelo matemático óptimo para el desarrollo del empaque biodegradable, mediante la aplicación de técnicas de diseño de experimentos y análisis de superficie de respuesta (Di Rienzo et al., 2008)

Fuentes de investigación

Se consultaron diversas fuentes secundarias confiables, incluyendo bases de datos científicas como SciELO, ResearchGate, Anecacao y el portal del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP). Además, se revisaron investigaciones empíricas publicadas en revistas científicas nacionales e internacionales, enfocadas en el aprovechamiento de subproductos agroindustriales y el desarrollo de materiales biodegradables.

Diseño del experimento

El proceso de fabricación del empaque biodegradable contempló el uso de harina de cascarilla de cacao como materia prima principal, complementada con glicerina y carboximetilcelulosa (CMC) como agentes plastificantes y estabilizantes,

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

respectivamente. Se establecieron distintas combinaciones experimentales de estos insumos, fundamentadas en estudios previos relacionados con formulaciones de biopolímeros (Gaitán & Ropero, 2021)

Factores de estudio

Los principales factores evaluados en el experimento fueron:

- Composición de la mezcla: proporciones de harina de cascarilla, glicerina y CMC.
- Tiempo de secado: duración del proceso de deshidratación del material.
- Resistencia mecánica: medida de la fuerza soportada por los empaques elaborados.

Diseño del proceso

El diseño del proceso de elaboración del empaque biodegradable comprendió varias etapas técnicas, desde el manejo de la materia prima hasta la obtención del producto final. Las fases principales fueron:

Preparación de la harina de cascarilla de cacao

- Recepción de la materia prima
- Descascarillado
- Lavado con ácido clorhídrico (HCl) al 5%
- Secado a 200°C por 20 minutos
- Molienda hasta obtener una granulometría menor a 2 mm.

Fabricación del empaque

- Mezcla de harina de cascarilla de cacao, carboximetilcelulosa, glicerina, agua y vinagre
- Reposo de la mezcla por 15 minutos
- Prensado y moldeado
- Cocción a 200°C por 20 minutos
- Evaluación de resistencia, estructura, olor y color.

Evaluaciones: Análisis de los componentes

Biodegradabilidad

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

La biodegradabilidad del empaque fue evaluada mediante la pérdida de peso del material después de un período de 14 días de exposición a condiciones ambientales controladas. Para cuantificar este comportamiento, se aplicó la siguiente ecuación:

$$PP = \frac{W1 - W2}{W1} \times 100\%$$

Donde:

- PP= Pérdida de peso (%)
- W1= Peso inicial del empaque
- W2= Peso final del empaque

Determinación de dureza

La dureza del material fue determinada mediante un durómetro Shore D, conforme a la norma NTE INEN 868 (2014). Se realizaron 15 mediciones en distintos puntos del empaque, con el objetivo de obtener un promedio representativo de la resistencia mecánica superficial (Díaz, 2017).

Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción del material fue evaluada de acuerdo con la norma (NTE INEN EN, 2013), la cual establece el procedimiento para medir la capacidad del empaque biodegradable para soportar fuerzas externas antes de su ruptura.

Criterio de aceptación

La selección del tratamiento óptimo se realizó con base en un análisis integral de los resultados obtenidos en las siguientes pruebas:

- Biodegradabilidad: Evaluación de la pérdida de peso tras exposición a condiciones ambientales controladas.
- Dureza: Medición mediante durómetro Shore D según la norma NTE INEN 868 (2014).
- Resistencia a la tracción: Determinación de la fuerza máxima soportada antes de la ruptura.
- Pruebas sensoriales: Evaluación cualitativa de características organolépticas como olor, color y textura del material (Andrade & Castro, 2019)

Este enfoque permitió garantizar que el empaque biodegradable seleccionado cumpliera con los requisitos de funcionalidad, sostenibilidad y aceptabilidad para su aplicación en el sector alimentario artesanal.

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Resultados

Análisis de los Resultados

Tratamiento

En la primera corrida experimental, y considerando las restricciones definidas por el sistema de ecuaciones, se estableció un total de 16 tratamientos experimentales generados mediante el software Design Expert® versión 11. En todos los tratamientos, la formulación incluyó un 96 % de insumos principales, conformados por harina de cascarilla de cacao, carboximetilcelulosa (CMC) y agua. El 4 % restante correspondió a aditivos funcionales, distribuidos entre vinagre y glicerina, cada uno con una participación del 2 %, utilizados como plastificantes y agentes estabilizantes.

Tabla 1.
Tratamiento de empaque

Tratamiento	H.cascarilla de cacao (%)	CMC (%)	Agua (%)	Vinagre (%)	Glicerina (%)
1	34.1726	17.8723	43.9551	2	2
2	35	17.7015	43.2985	2	2
3	33.3292	17	45.6708	2	2
4	35	18.72	42.28	2	2
5	33.6604	19	43.3396	2	2
6	33.3292	17	45.6708	2	2
7	33.6604	19	43.3396	2	2
8	35	17	44	2	2
9	34.3101	17	44.6899	2	2
10	34.4078	18.4363	43.156	2	2
11	33	18.199	44.801	2	2
12	34.1726	17.8723	43.9551	2	2
13	34.1726	17.8723	43.9551	2	2
14	35	18.72	42.28	2	2
15	33	18.8826	44.1174	2	2
16	33.6042	17.489	44.9069	2	2

Nota: La tabla presenta los tratamientos experimentales utilizados en la formulación de empaques biodegradables, detallando la composición porcentual de harina de cascarilla de cacao (H. cascarilla de cacao), carboximetilcelulosa (CMC), agua, vinagre y glicerina. Cada tratamiento varía en la proporción de los tres primeros componentes, mientras que la concentración de vinagre y glicerina se mantiene constante en 2%. Estos tratamientos fueron diseñados para evaluar el impacto de las variables en las propiedades finales del empaque.

Fuente: datos aportados por Software Estadístico Desing Expert ®, versión 11

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Asignación de valores

Se procedió a cargar en el software Design Expert® versión 11 las variables correspondientes a los análisis sensoriales, de dureza y biodegradabilidad, con el propósito de evaluar las características de la línea de producción de empaques biodegradables elaborados a partir de harina de cascarilla de cacao. A partir de estos datos, se realizó la selección de los tratamientos que cumplieran con los criterios de aceptabilidad definidos previamente.

Paralelamente, se elaboraron físicamente los 16 tratamientos experimentales, los cuales fueron evaluados sensorialmente conforme a las variables establecidas. Los resultados obtenidos mostraron que las características de color y olor se mantuvieron consistentes con las propiedades naturales de la materia prima. En cuanto a la textura, las muestras presentaron un aspecto semi liso en su mayoría.

Respecto al análisis de biodegradabilidad, se observó un rango de descomposición del material entre 11,76 % y 29,42 % tras el período de exposición. En el caso de la dureza, medida mediante un durómetro Shore D, los valores obtenidos fueron el promedio de 15 mediciones puntuales realizadas por muestra, alcanzando un rango de 3,14 a 10,53 HD según el tratamiento.

Las concentraciones evaluadas reflejaron diferencias significativas en cuanto a la dureza, biodegradabilidad y calidad sensorial, indicando que algunas formulaciones requieren ajustes para mejorar sus propiedades mecánicas y funcionales. Cabe señalar que la concentración de harina de cascarilla de cacao utilizada en esta investigación fue superior a la reportada por Cuba et al. (2021), quienes emplearon una proporción del 2 %.

Los resultados detallados para cada tratamiento se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.
Resultado de análisis

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Análisis sensoriales				Biodegradabilidad	Dureza
Run	Color	Textura	Olor	Resultado (%)	Resultado HD
1	2	2	2	23.529	3.14
2	1	2	1	22.058	4.01
3	2	1	1	17.647	7.46
4	1	2	1	29.411	3.6
5	2	1	1	26.470	4.03
6	2	1	1	17.647	7.46
7	2	1	1	26.470	4.03
8	1	2	1	21.47	9.1
9	1	1	1	11.764	10.53
10	2	1	1	25.000	4.43
11	1	1	1	24.941	5.20
12	2	2	2	23.529	3.14
13	2	2	2	23.529	3.14
14	1	2	1	29.411	3.6
15	1	1	1	23.529	5.33
16	1	3	2	14.705	7.70

Nota: La tabla presenta los resultados del análisis sensorial, biodegradabilidad y dureza de diferentes tratamientos en la formulación de empaques biodegradables. Los parámetros evaluados incluyen color, textura y olor en una escala ordinal, donde valores más bajos representan mejores características sensoriales. La biodegradabilidad (%) indica la pérdida de peso del material tras un período de prueba, reflejando su capacidad de descomposición. La dureza (HD) mide la resistencia mecánica del empaque, con valores más altos indicando mayor rigidez. Los datos permiten identificar el equilibrio entre biodegradabilidad y resistencia estructural para determinar la formulación óptima del empaque.

Fuente: Autor, 2022

Análisis de la varianza en parámetros sensoriales

Para el análisis de varianza (ANOVA) de los parámetros sensoriales, biodegradabilidad y dureza, se empleó el software estadístico Design Expert® versión 11, el cual permitió evaluar la significancia de los modelos aplicados y determinar el efecto de las variables independientes sobre las respuestas analizadas.

Color.

Para el análisis del parámetro color, se aplicó un modelo cúbico transformado mediante raíz cuadrada, el cual presentó un buen ajuste a los datos experimentales. En la e muestra un valor F de 5,78 y un valor p (p-valué) de 0,02, lo que indica que el modelo es estadísticamente significativo al nivel de confianza del 95 %. Asimismo, se estima un

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

2,24 % de probabilidad de error, lo que sugiere una baja posibilidad de que los resultados obtenidos se deban al azar

.**Tabla 3** e muestra un valor F de 5,78 y un valor p (p-valué) de 0,02, lo que indica que el modelo es estadísticamente significativo al nivel de confianza del 95 %. Asimismo, se estima un 2,24 % de probabilidad de error, lo que sugiere una baja posibilidad de que los resultados obtenidos se deban al azar

.**Tabla 3.**
Anova para el parámetro Color

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0.3077	9	0.0342	5.78	0.0224	significant
(1)Linear	0.0257	2	0.0129	2.17	0.1948	
Mixture						
AB	0.0169	1	0.0169	2.86	0.1415	
AC	0.0001	1	0.0001	0.0147	0.9075	
BC	0.0011	1	0.0011	0.1806	0.6857	
ABC	0.0016	1	0.0016	0.2700	0.6219	
AB(A-B)	0.0009	1	0.0009	0.1562	0.7064	
AC(A-C)	0.0000	1	0.0000	0.0082	0.9307	
BC(B-C)	0.0016	1	0.0016	0.2709	0.6214	
Residual	0.0355	6	0.0059			
Lack of Fit	0.0355	1	0.0355			
Pure Error	0.0000	5	0.0000			
Cor Total	0.3431	15				

Nota: La tabla presenta un análisis de varianza (ANOVA) donde el modelo general es significativo ($p = 0.0224$), lo que indica que explica una parte relevante de la variabilidad de los datos; sin embargo, los efectos individuales y las interacciones (AB, AC, BC, ABC) no son significativos ($p > 0.05$), lo que sugiere que ninguno de ellos influye de manera relevante en la variable de respuesta. El término "Linear" tampoco es significativo ($p = 0.1948$), y el error residual (0.0355) representa la variabilidad no explicada por el modelo. Además, el "Lack of Fit" muestra que no hay un mal ajuste del modelo, lo que implica que la variabilidad no explicada podría deberse a otros factores no considerados en el diseño experimental.

Fuente: Design Expert ®, versión 11

Un valor de R^2 previsto negativo indica que la media general de los datos proporciona una mejor predicción de la respuesta que el modelo ajustado. Esto sugiere que el modelo

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

actual no es adecuado para realizar predicciones confiables, y que podría ser necesario considerar un modelo de orden superior para mejorar el ajuste. Los detalles se presentan en la Tabla 4.

Por otro lado, el indicador Adeq Precisión, que mide la relación señal/ruido, presenta un valor de 6954, muy por encima del valor mínimo recomendado de 4. Este resultado indica que el modelo posee una señal adecuada y puede ser utilizado eficazmente para navegar dentro del espacio de diseño experimental.

Tabla 4.
Estadística de ajuste

Std. Dev.	**0.0769**	**R^2**	**0.8967**
Mean	0.8536	**Adjusted R^2**	0.7416
C.V. %	9.01	**Predicted R^2**	-60.6725
		Adeq Precision	6.9540

Nota: La tabla presenta indicadores estadísticos de un modelo de regresión. El coeficiente de determinación R2R^2R2 es de 0.8967, lo que indica que el modelo explica aproximadamente el 89.67% de la variabilidad en los datos. Sin embargo, el R2R^2R2 ajustado (0.7416) es menor, lo que sugiere que algunos predictores pueden no contribuir significativamente. El R2R^2R2 predicho es negativo (-60.6725), lo que indica una capacidad de predicción deficiente y sugiere que el modelo podría no ser adecuado para hacer predicciones confiables. La desviación estándar del modelo es 0.0769, mientras que el coeficiente de variación (C.V.%) de 9.01 indica una variabilidad relativa moderada en los datos. Finalmente, la "Adeq Precisión" de 6.9540, superior a 4, indica que el modelo tiene una buena relación señal/ruido y es adecuado para navegar en el espacio de diseño, aunque la baja capacidad predictiva debe ser considerada para posibles ajustes en el modelo.

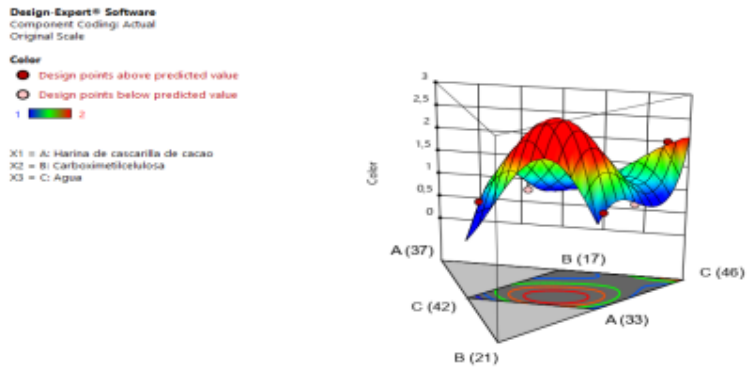
Fuente: Design Expert ®, versión 11

Así mismo, la ecuación real se compone de la siguiente manera: Sqrt(Color)=(3,09*A)+(11,34*B)+(1,45*C)+(18,46*AB)+(,27*AC)+(23,34*BC) +(-6,33*ABC)+(-21,83*AB(A-B))+(-3,21*AC(A-C))+(17,82*BC(B-C)).

Se determina los componentes A: Harina de cascarilla de cacao, B: Carboximetilcelulosa, C: Agua, los puntos rojos representan el valor con mayor relevancia en la gráfica, su posición es representada por cada uno de los componentes, ver Figura 1.

ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Figura 1.
Color



Nota: La imagen muestra una superficie de respuesta generada en Design-Expert® Software, donde se analiza la variable color en función de la harina de cascarilla de cacao (A), carboximetilcelulosa (B) y agua (C). La escala cromática indica variaciones en la respuesta, con zonas en rojo representando valores superiores a los predichos y en azul valores inferiores. La gráfica inferior representa un mapa de contornos para visualizar mejor las combinaciones óptimas de factores.

Fuente: Autor, 2022

Olor.
Para este parámetro se empleó un modelo cuadrático especial, el cual mostró un adecuado ajuste a los datos experimentales. En la Tabla 23 se reporta un valor F de 116,81 y un valor p de 0,02, lo que indica que el modelo es estadísticamente significativo al nivel de confianza del 95 %. Además, se identificó una probabilidad de error del 0,01 %, lo que refuerza la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Dentro del análisis del modelo, los términos C, AB, A^2BC, AB^2C y ABC^2 resultaron ser significativos, lo que significa que tienen un efecto estadísticamente relevante sobre la variable de respuesta. Por el contrario, los valores p superiores a 0,1000 reflejan que ciertos términos no son significativos dentro del modelo y, por tanto, pueden considerarse prescindibles para fines predictivos o de optimización.

Tabla 5.
Anova para el parámetro olor

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	2.98	8	0.3722	116.81	< 0.0001	significant
(1)Linear Mixture	0.0842	2	0.0421	13.22	0.0042	
AB	0.0612	1	0.0612	19.19	0.0032	
AC	0.0067	1	0.0067	2.11	0.1898	
BC	0.0068	1	0.0068	2.14	0.1866	
A^2BC	0.1803	1	0.1803	56.59	0.0001	
AB^2C	0.2037	1	0.2037	63.92	< 0.0001	
ABC^2	0.6141	1	0.6141	192.71	< 0.0001	
Residual	0.0223	7	0.0032			
Lack of Fit	0.0223	2	0.0112			
Pure Error	0.0000	5	0.0000			
Cor Total	3.00	15				

Nota: La tabla muestra un Análisis de Varianza (ANOVA) para un modelo estadístico, donde el modelo general es significativo ($p < 0.0001$), indicando que explica una parte considerable de la variabilidad en los datos. El término lineal también es significativo ($p = 0.0042$), sugiriendo que los efectos principales tienen influencia en la respuesta. Entre las interacciones, AB ($p = 0.0032$) y los términos no lineales A^2BC, AB^2C y ABC^2 presentan alta significancia ($p < 0.0001$), lo que indica interacciones cuadráticas y combinaciones de factores que afectan el resultado. Por otro lado, AC y BC no son significativos ($p > 0.05$), sugiriendo que su efecto individual no es relevante. La varianza residual es baja (0.0032), lo que indica un buen ajuste del modelo a los datos.

Fuente: Design Expert ®, versión 11

El valor de R^2 previsto (0,7157) no se encuentra lo suficientemente cercano al R^2 ajustado (0,9841), como normalmente se esperaría en un modelo bien ajustado. La diferencia, superior a 0,2, sugiere la posible presencia de un efecto de bloque considerable o problemas asociados al modelo y/o los datos utilizados. Este comportamiento puede deberse a diversos factores, tales como la necesidad de reducir el modelo, aplicar una transformación a la variable de respuesta, o la existencia de valores atípicos que distorsionan el ajuste. En este contexto, se recomienda realizar ejecuciones de confirmación para validar el comportamiento empírico del modelo. Los detalles correspondientes se presentan en la Tabla 24.

Por otro lado, el índice Adeq Precisión, que mide la relación señal/ruido, arrojó un valor de 25,924, el cual supera ampliamente el umbral mínimo recomendado de 4. Esto indica que el modelo posee una capacidad predictiva adecuada dentro del espacio experimental definido.

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

La ecuación real del modelo, obtenida para la variable de respuesta olor, se expresa de la siguiente manera:

$$Olor = (-0{,}0267 \cdot A) + (0{,}0438 \cdot B) + (0{,}9095 \cdot C) + (8{,}05 \cdot AB) + (2{,}03 \cdot AC) + (1{,}82 \cdot BC) - (70{,}67 \cdot A^2BC) - (79{,}32 \cdot AB^2C) + (113{,}01 \cdot ABC^2)$$

Tabla 6.
Estadística de ajuste

Std. Dev.	0.0564	R^2	0.9926
Mean	1.25	Adjusted R^2	0.9841
C.V. %	4.52	Predicted R^2	0.7157
		Adeq Precision	25.9244

.

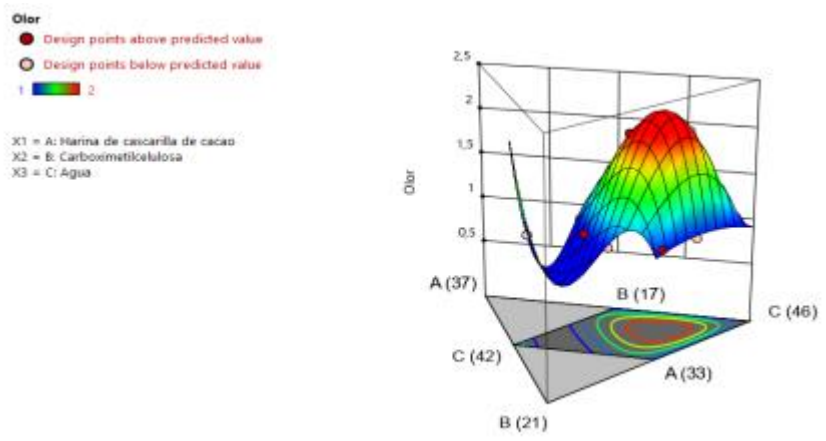
Nota: La tabla muestra los estadísticos de ajuste del modelo, destacando un R^2 de 0.9926, lo que indica que el modelo explica el 99.26% de la variabilidad en los datos. El R^2 ajustado (0.9841) es ligeramente menor, lo que confirma que el modelo mantiene un buen ajuste incluso al considerar el número de predictores. Sin embargo, el R^2 predicho (0.7157) es significativamente menor, lo que sugiere que la capacidad de generalización del modelo puede no ser óptima. La desviación estándar (0.0564) indica una baja variabilidad en los residuos, mientras que el coeficiente de variación (C.V.%) de 4.52% refleja una baja dispersión relativa. Finalmente, el Adeq Precisión de 25.9244, superior a 4, indica una excelente relación señal/ruido, validando la fiabilidad del modelo para exploraciones dentro del espacio de diseño.

Fuente: Design Expert ®, versión 11

Los componentes A: Harina de cascarilla de cacao, B: Carboximetilcelulosa, C: Agua, los puntos rojos representan el valor con mayor relevancia en la gráfica, su posición es representada por cada uno de los componentes, Figura 2

Figura 2.
Olor

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81



Nota: La imagen muestra una superficie de respuesta generada en Design-Expert® Software, representando la variable olor en función de la harina de cascarilla de cacao (A), carboximetilcelulosa (B) y agua (C). La escala de colores indica variaciones en la respuesta, donde zonas en rojo representan valores superiores a los predichos y zonas en azul valores inferiores. La gráfica inferior es un mapa de contornos que facilita la identificación de combinaciones óptimas de factores. Los puntos marcados en rojo señalan valores observados que superan las predicciones, mientras que los restantes valores siguen la tendencia del modelo.

Fuente: Design Expert ®, versión 11

Textura.

Para este parámetro se utilizó un modelo cúbico transformado mediante cuadrado inverso, el cual mostró un buen ajuste a los datos experimentales. En la se reporta un valor F de 18,43 y un valor p de 0,10, lo que indica que el modelo es estadísticamente significativo al nivel del 90 % de confianza. Este valor también refleja una probabilidad de error del 0,10 %, lo cual respalda la confiabilidad del modelo en el contexto del análisis experimental.

En este modelo, los términos A, B, C, AB, AC, BC, ABC, AB(A–B), AC(A–C) y BC(B–C) fueron identificados como significativos, ya que influyen de manera relevante en la variable de respuesta. En contraste, aquellos términos que presentaron valores p superiores a 0,1000 se consideran no significativos, por lo tanto, no aportan de forma sustancial a la explicación del comportamiento del sistema y podrían ser eliminados en una versión reducida del modelo.

Tabla 7 se reporta un valor F de 18,43 y un valor p de 0,10, lo que indica que el modelo es estadísticamente significativo al nivel del 90 % de confianza. Este valor también refleja una probabilidad de error del 0,10 %, lo cual respalda la confiabilidad del modelo en el contexto del análisis experimental.

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

En este modelo, los términos A, B, C, AB, AC, BC, ABC, AB(A–B), AC(A–C) y BC(B–C) fueron identificados como significativos, ya que influyen de manera relevante en la variable de respuesta. En contraste, aquellos términos que presentaron valores p superiores a 0,1000 se consideran no significativos, por lo tanto, no aportan de forma sustancial a la explicación del comportamiento del sistema y podrían ser eliminados en una versión reducida del modelo.

Tabla 7.
Anova para el parámetro textura

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0.3831	9	0.0426	18.43	0.0010	significant
[1]Linear Mixture	0.1450	2	0.0725	31.38	0.0007	
AB	0.0216	1	0.0216	9.34	0.0223	
AC	0.0483	1	0.0483	20.89	0.0038	
BC	0.0274	1	0.0274	11.87	0.0137	
ABC	0.0649	1	0.0649	28.10	0.0018	
AB(A-B)	0.0342	1	0.0342	14.79	0.0085	
AC(A-C)	0.0488	1	0.0488	21.12	0.0037	
BC(B-C)	0.0232	1	0.0232	10.06	0.0193	
Residual	0.0139	6	0.0023			
Lack of Fit	0.0139	1	0.0139			
Pure Error	0.0000	5	0.0000			
Cor Total	0.3969	15				

Nota: La tabla presenta un Análisis de Varianza (ANOVA) para evaluar la influencia de distintos factores en un modelo estadístico. El modelo general es significativo ($p = 0.0010$), lo que indica que explica una parte relevante de la variabilidad en los datos. El término lineal también es significativo ($p = 0.0007$), sugiriendo que los efectos principales contribuyen al modelo. Las interacciones AB ($p = 0.0223$), AC ($p = 0.0038$) y BC ($p = 0.0137$) son significativas, indicando que la combinación de estos factores influye en la respuesta. Asimismo, las combinaciones de orden superior ABC ($p = 0.0018$), AB(A-B), AC(A-C) y BC(B-C) también son estadísticamente significativas, lo que sugiere que existen efectos combinados complejos en la variable de estudio. La baja varianza residual (0.0023) sugiere un buen ajuste del modelo a los datos experimentales.

Fuente: Design Expert ®, versión 11

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Así mismo, la ecuación real se compone de la siguiente manera: 1/Sqrt (Textura)=(45,35*A)+(41,68*B)+(2,89*C)+(14,73*AB)+(87,84*AC)+(83, 63*BC)+(-28,52*ABC)+(93,87*AB(A-B))+(71,94*AC(A-C))+(-48,00 BC(B-C)).

Tabla 8.
Estadística de ajuste

Std. Dev.	0.0481	R^2	0.9651
Mean	0.8454	Adjusted R^2	0.9127
C.V. %	5.68	Predicted R^2	-19.8303
		Adeq Precision	12.8075

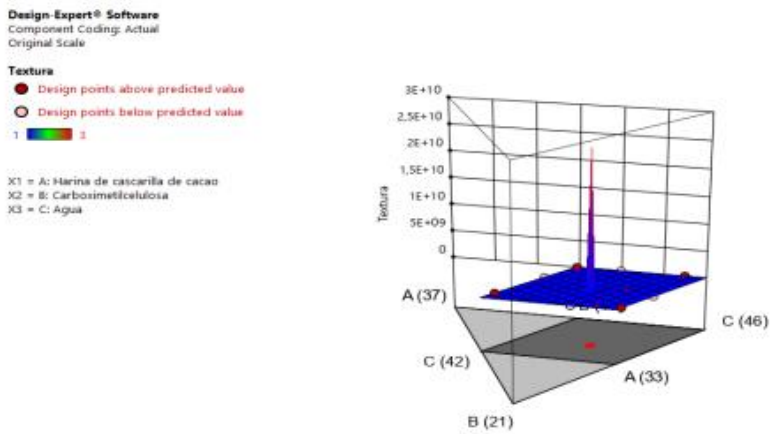
Nota: La tabla muestra los estadísticos de ajuste del modelo, con un R^2 de 0.9651, indicando que el modelo explica el 96.51% de la variabilidad en los datos. El R^2 ajustado (0.9127) sugiere un buen ajuste considerando el número de predictores, pero el R^2 predicho negativo (-19.8303) indica una baja capacidad de generalización. La desviación estándar (0.0481) y el coeficiente de variación (5.68%) reflejan una variabilidad moderada en los datos. La Adeq Precisión de 12.8075, superior a 4, confirma una buena relación señal/ruido, aunque el bajo R^2 predicho sugiere que el modelo podría no ser fiable para predicciones.

Fuente: Design Expert ®, versión 11

Se determina los componentes A: Harina de cascarilla de cacao, B: Carboximetilcelulosa, C: Agua, los puntos rojos representan el valor con mayor relevancia en la gráfica, su posición es representada por cada uno de los componentes, ver

Figura **3**

Figura 3.
Textura



Nota: La imagen muestra una superficie de respuesta generada en Design-Expert® Software, representando la variable textura en función de la harina de cascarilla de cacao

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

(A), carboximetilcelulosa (B) y agua (C). La escala de colores indica variaciones en la respuesta, con puntos en rojo señalando valores observados por encima de los predichos y en azul por debajo. Se observa un pico extremo en la respuesta, lo que sugiere una posible anomalía en los datos o una alta sensibilidad del modelo en ciertas combinaciones de factores. La gráfica inferior representa un mapa de contornos, facilitando la visualización de las áreas críticas en el diseño experimental.

Fuente: Design Expert ®, versión 11

Biodegradabilidad. Para este parámetro se aplicó un modelo lineal, transformado mediante raíz cuadrada, el cual mostró un adecuado ajuste a los datos experimentales. En la se reporta un valor F de 16,35 y un valor p de 0,0003, lo que indica que el modelo es estadísticamente significativo al nivel del 99,97 % de confianza. Este resultado implica una probabilidad de error del 0,03 %, lo que refuerza la confiabilidad del modelo.

En este caso, los términos B y C resultaron ser significativos, lo que evidencia su influencia directa sobre la variable de respuesta. Por otro lado, los términos con valores p superiores a 0,1000 se consideran no significativos, y su presencia puede afectar la eficiencia del modelo.

Cuando existen múltiples términos no significativos (excluyendo aquellos necesarios para mantener la jerarquía del modelo), se recomienda considerar una reducción del modelo con el fin de optimizar su ajuste y capacidad predictiva.

Tabla 9 se reporta un valor F de 16,35 y un valor p de 0,0003, lo que indica que el modelo es estadísticamente significativo al nivel del 99,97 % de confianza. Este resultado implica una probabilidad de error del 0,03 %, lo que refuerza la confiabilidad del modelo.

En este caso, los términos B y C resultaron ser significativos, lo que evidencia su influencia directa sobre la variable de respuesta. Por otro lado, los términos con valores p superiores a 0,1000 se consideran no significativos, y su presencia puede afectar la eficiencia del modelo.

Cuando existen múltiples términos no significativos (excluyendo aquellos necesarios para mantener la jerarquía del modelo), se recomienda considerar una reducción del modelo con el fin de optimizar su ajuste y capacidad predictiva.

Tabla 9.
Anova para el parámetro biodegradabilidad

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	3.27	2	1.63	16.35	0.0003	significant
(1)Linear Mixture	3.27	2	1.63	16.35	0.0003	
Residual	1.30	13	0.0999			
Lack of Fit	1.30	8	0.1624			
Pure Error	0.0000	5	0.0000			
Cor Total	4.57	15				

Nota: La tabla muestra un Análisis de Varianza (ANOVA) en el que el modelo general es significativo (p = 0.0003), lo que indica que explica una parte importante de la variabilidad en los datos. El término lineal también es significativo con el mismo valor de p, sugiriendo que los efectos principales tienen una influencia relevante en la respuesta. El residual (0.0999) refleja la variabilidad no explicada por el modelo, mientras que el Lack of Fit (0.1624) indica que no hay un mal ajuste significativo del modelo. Finalmente, el error puro es 0, lo que sugiere que no hubo variabilidad dentro de las repeticiones experimentales.

Fuente: Design Expert ®, versión 11

El valor de R^2 pronosticado (0,5678) muestra una concordancia razonable con el R^2 ajustado (0,6718), ya que la diferencia entre ambos es inferior a 0,2, lo que sugiere que el modelo posee una capacidad predictiva aceptable dentro del rango de datos analizados.

Por otro lado, el índice Adeq Precision, que mide la relación señal/ruido, alcanzó un valor de 10,042, superando ampliamente el umbral mínimo recomendado de 4. Este resultado indica que el modelo cuenta con una señal adecuada y es apropiado para navegar en el espacio de diseño experimental.

La ecuación real del modelo, expresada en términos de la variable transformada, es la siguiente:

$$1/\sqrt{(\text{Biodegradabilidad})} = (4{,}75 \cdot A) + (6{,}30 \cdot B) + (3{,}91 \cdot C)$$

Tabla 10.
Estadística de ajuste

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

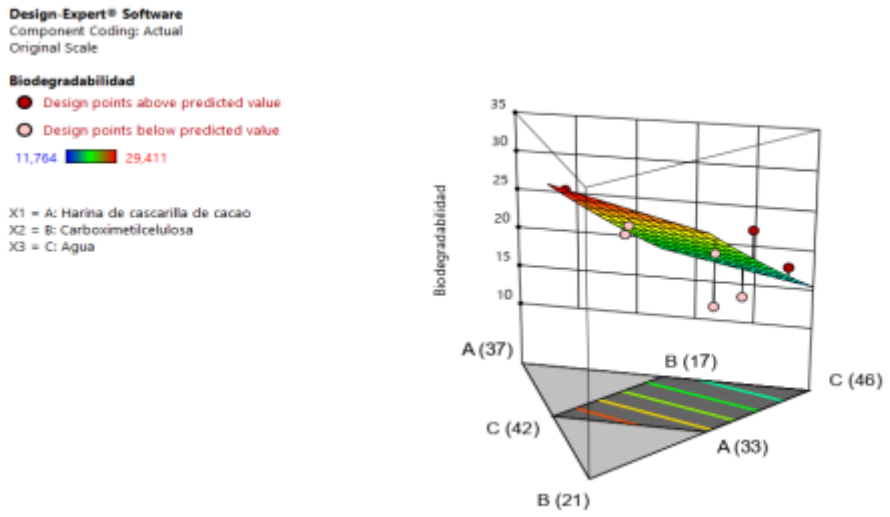
Std. Dev.	0.3161	R^2	0.7155
Mean	4.72	Adjusted R^2	0.6718
C.V. %	6.70	Predicted R^2	0.5678
		Adeq Precision	10.0424

Nota: La tabla presenta los estadísticos de ajuste del modelo, con un R^2 de 0.7155, indicando que el modelo explica el 71.55% de la variabilidad en los datos. El R^2 ajustado (0.6718) es menor, lo que sugiere que algunos predictores pueden no ser altamente relevantes. El R^2 predicho (0.5678) es más bajo, lo que indica que el modelo tiene una capacidad de predicción moderada. La desviación estándar (0.3161) y el coeficiente de variación (C.V. % = 6.70) reflejan una variabilidad aceptable. Finalmente, la Adeq Precisión (10.0424), superior a 4, indica que el modelo tiene una buena relación señal/ruido, lo que sugiere que es adecuado para navegar dentro del espacio de diseño.

Fuente: Design Expert ®, versión 11

Se determina los componentes A: Harina de cascarilla de cacao, B: Carboximetilcelulosa, C: Agua, los puntos rojos representan el valor con mayor relevancia en la gráfica, su posición es representada por cada uno de los componentes, ver Figura 4.

Figura 4.
Biodegradabilidad



Nota: Muestra la biodegradabilidad de los empaques evaluados en función del tiempo, utilizando datos obtenidos a partir del software Design Expert ®, versión 11.

Fuente: Design Expert ®, versión 11

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Dureza

Para este parámetro se aplicó un modelo especial cúbico, transformado mediante raíz cuadrada, el cual mostró un buen ajuste a los datos experimentales. En la se reporta un valor F de 10,06 y un valor p de 0,0015, lo que indica que el modelo es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 99,85 %. Esto implica una probabilidad de error del 0,15 %, lo cual respalda la confiabilidad del modelo para describir el comportamiento de la variable de respuesta.

En este análisis, los términos B, C y ABC fueron identificados como significativos, lo que evidencia su influencia directa sobre la variable evaluada. Por el contrario, los términos con valores p superiores a 0,1000 no se consideran estadísticamente significativos y, por tanto, no contribuyen de manera relevante al modelo.

Tabla 11 se reporta un valor F de 10,06 y un valor p de 0,0015, lo que indica que el modelo es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 99,85 %. Esto implica una probabilidad de error del 0,15 %, lo cual respalda la confiabilidad del modelo para describir el comportamiento de la variable de respuesta.

En este análisis, los términos B, C y ABC fueron identificados como significativos, lo que evidencia su influencia directa sobre la variable evaluada. Por el contrario, los términos con valores p superiores a 0,1000 no se consideran estadísticamente significativos y, por tanto, no contribuyen de manera relevante al modelo.

Tabla 11.

Anova para el parámetro Dureza

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	3.00	6	0.5002	10.06	0.0015	significant
(1)Linear Mixture	1.81	2	0.9026	18.15	0.0007	
AB	0.0001	1	0.0001	0.0023	0.9624	
AC	0.0889	1	0.0889	1.79	0.2140	
BC	0.0603	1	0.0603	1.21	0.2992	
ABC	0.2608	1	0.2608	5.25	0.0477	
Residual	0.4474	9	0.0497			
Lack of Fit	0.4474	4	0.1119			
Pure Error	0.0000	5	0.0000			
Cor Total	3.45	15				

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Nota: El ANOVA indica que el modelo es significativo ($p = 0.0015$), con un efecto lineal relevante ($p = 0.0007$). Las interacciones AB, AC y BC no son significativas ($p > 0.05$), pero ABC sí lo es ($p = 0.0477$), sugiriendo un efecto combinado de los tres factores. El Lack of Fit no es significativo, lo que confirma un buen ajuste del modelo.

Fuente: Design Expert ®, versión 11

El valor de R^2 pronosticado (0,7452) muestra una concordancia aceptable con el R^2 ajustado (0,7838), ya que la diferencia entre ambos es inferior a 0,2, lo cual sugiere que el modelo posee una capacidad predictiva adecuada dentro del rango experimental considerado.

El indicador Adeq Precisión, que evalúa la relación señal/ruido, obtuvo un valor de 9,799, superando el umbral mínimo recomendado de 4. Esto confirma que el modelo presenta una señal estadísticamente confiable, por lo que puede utilizarse de manera efectiva para navegar en el espacio de diseño. Los resultados completos se encuentran en la Tabla 12.

La ecuación real del modelo, expresada en función de la variable transformada, se define de la siguiente manera:

$$1/\sqrt{(\text{Dureza})} = (0{,}8239 \cdot A) + (3{,}96 \cdot B) + (2{,}52 \cdot C) - (0{,}3029 \cdot AB) + (5{,}46 \cdot AC) - (3{,}36 \cdot BC) - (24{,}21 \cdot ABC)$$

Tabla 12.
Estadística de ajuste

Std. Dev.	0.2230	R^2	0.8703
Mean	2.27	Adjusted R^2	0.7838
C.V. %	9.82	Predicted R^2	0.7452
		Adeq Precision	9.7993

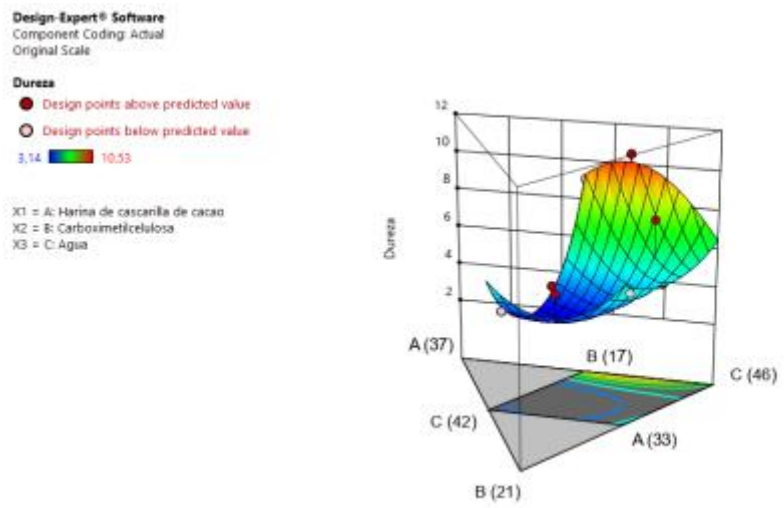
Nota: El modelo presenta un R^2 de 0.8703, indicando que explica el 87.03% de la variabilidad en los datos. El R^2 ajustado (0.7838) y el R^2 predicho (0.7452) sugieren una buena capacidad de ajuste y predicción. La desviación estándar (0.2230) y el C.V. % (9.82) reflejan una variabilidad moderada. Finalmente, la Adeq Precisión (9.7993) superior a 4 confirma una buena relación señal/ruido, validando la fiabilidad del modelo.

Fuente: Design Expert ®, versión 11

Se determina los componentes A: Harina de cascarilla de cacao, B: Carboximetilcelulosa, C: Agua, los puntos rojos representan el valor con mayor relevancia en la gráfica, su posición es representada por cada uno de los componentes, ver en Figura 5.

Figura 5.
Dureza

ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81



Nota: La figura muestra una superficie de respuesta para la variable dureza, en función de la harina de cascarilla de cacao (A), carboximetilcelulosa (B) y agua (C). La escala de colores indica variaciones en dureza, donde los valores más bajos (azul) representan menor dureza y los más altos (rojo) mayor resistencia. Los puntos rojos están por encima del valor predicho y los blancos por debajo. El mapa de contornos en la parte inferior ayuda a visualizar la distribución de la dureza en el diseño experimental.

Fuente: Design Expert ®, versión 11

Soluciones: Los análisis de varianza presentados en las tablas fueron procesados mediante el software Design Expert® versión 11, el cual generó un total de 40 soluciones posibles para la optimización del modelo. De estas opciones, se seleccionó la solución número uno, al presentar un valor de deseabilidad del 100 %, lo que indica un cumplimiento óptimo de los criterios establecidos para las variables de respuesta.

La formulación óptima propuesta por el programa incluye los siguientes porcentajes de componentes:

- Harina de cascarilla de cacao (A): 34,310 %
- Carboximetilcelulosa (B): 17,000 %
- Agua (C): 44,690 %

En la presenta en detalle la solución generada por el software, la cual fue considerada como la más adecuada para la elaboración del empaque biodegradable.

Tabla 13 presenta en detalle la solución generada por el software, la cual fue considerada como la más adecuada para la elaboración del empaque biodegradable.

Tabla 13.
Solución más óptima

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

A	B	C	D	E	F	G	H	Desirability
34.31	17.00	44.69	1.10	1.06	1.05	17.53	10.04	1.00

Nota: La tabla muestra los valores óptimos de las variables A, B, C, D, E, F, G y H para maximizar la deseabilidad, que alcanza un valor de 1.00, indicando la mejor combinación posible según el modelo. Estos parámetros representan la configuración ideal para obtener el resultado óptimo en el proceso analizado.

Fuente: Autores, 2022. Datos arrojados por Design Expert ®, versión 11

Este tratamiento, correspondiente a la concentración óptima de insumos, fue seleccionado tras la etapa de optimización realizada en el software Design Expert® versión 11, debido a que presentó los mejores resultados globales, destacándose en los análisis sensoriales, así como en la mayor dureza y resistencia mecánica, lo que contribuye significativamente a la mejora de la calidad del producto final.

Análisis de dureza: Se determinó que este tratamiento superó a las demás formulaciones evaluadas, confirmando la adecuada combinación de los componentes. El análisis arrojó un valor promedio de dureza de 11 HD, calculado a partir de 15 mediciones puntuales realizadas con durómetro Shore D. Los resultados detallados se encuentran en la Tabla 14.

Tabla 14.
Dureza, Tratamiento solución

Tratamiento Solución		
Toma izquierda	Toma media	Toma derecha
1.- 15.5 HD	6.- 9.5 HD	11.- 13.5 HD
2.- 9.0 HD	7.- 8.5 HD	12.- 8.5 HD
3.- 13.0 HD	8.- 13.5 HD	13.- 9.0 HD
4.- 10.2 HD	9.- 7.0 HD	14.- 7.0 HD
5.- 11.3 HD	10.- 16.0 HD	15.- 8.5 HD
Promedio= 11 gomas de neumático (medio duro)		

Nota: La tabla muestra los resultados del Tratamiento Solución, evaluando la dureza (HD) en tres puntos de medición: izquierda, media y derecha. Los valores obtenidos varían entre 7.0 HD y 16.0 HD, con un promedio de 11 HD, indicando una dureza equivalente a goma de neumático medio duro. Esto sugiere una distribución homogénea de la dureza en el material tratado.

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Fuente: Autores, 2022

Análisis de resistencia a la tracción La resistencia a la tracción se define como una propiedad mecánica y física que permite evaluar el comportamiento de un material al ser sometido a diferentes tipos de cargas externas. En este contexto, el material biodegradable elaborado a partir de harina de cascarilla de cacao alcanza su punto máximo de deformación bajo dichas condiciones. Los resultados correspondientes a la muestra del tratamiento final, evaluada en esta prueba, se detallan en la Tabla 15.

Tabla 15.
Análisis de resistencia a la tracción

Muestra	Max. Carga	Max.Esfuerzo	Max.Deformación
Unidades	N*	Mpa**	%***
22-7059-1	4.01	0.121	6.11
22-7059-2	9.33	0.278	6.38
22-7059-3	6.66	0.2	4.31
22-7059-4	5.47	0.168	5.96
22-7059-5	1.79	0.0704	3.48
Media	5.45	0.167	5.25
Desviación Estándar	2.83	0.0788	1.28
Coef.Variación	0.519	0.471	0.244

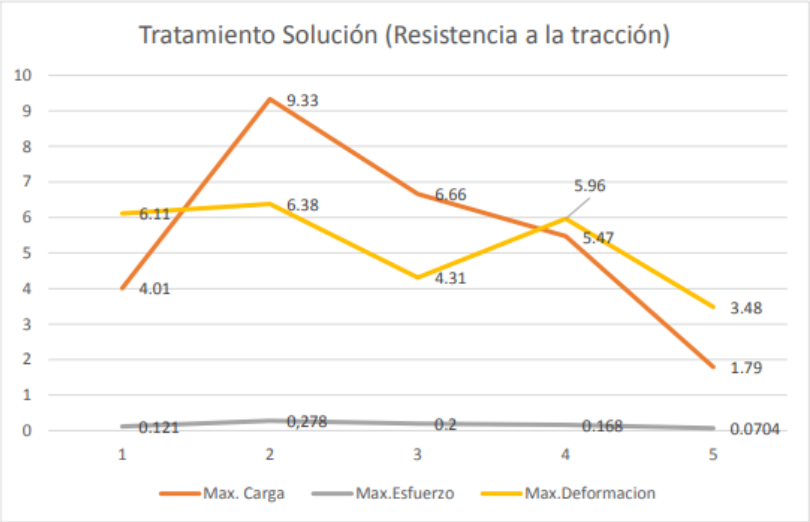
Nota: La tabla presenta los resultados de máxima carga, esfuerzo y deformación en diferentes muestras analizadas. La carga máxima varía entre 1.79 N y 9.33 N, con una media de 5.45 N. El máximo esfuerzo promedio es 0.167 MPa, con una desviación estándar de 0.0788 MPa, mientras que la máxima deformación promedio es 5.25%, con una variabilidad de 1.28%. El coeficiente de variación indica una dispersión moderada en los datos, reflejando diferencias en la resistencia de las muestras evaluadas.

Fuente: Laboratorio de evaluación de materiales-Espol(2021).
Unidades:N,newton;Mpa,megapascal; % ,porcentaje

Se determinó que el tratamiento solución en el análisis de resistencia a la tracción el máximo esfuerzo y deformación mantienen una relación con la máxima carga que se le aplica, ver Figura 6

Figura 6.
Tratamiento solución (Resistencia a la tracción)

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

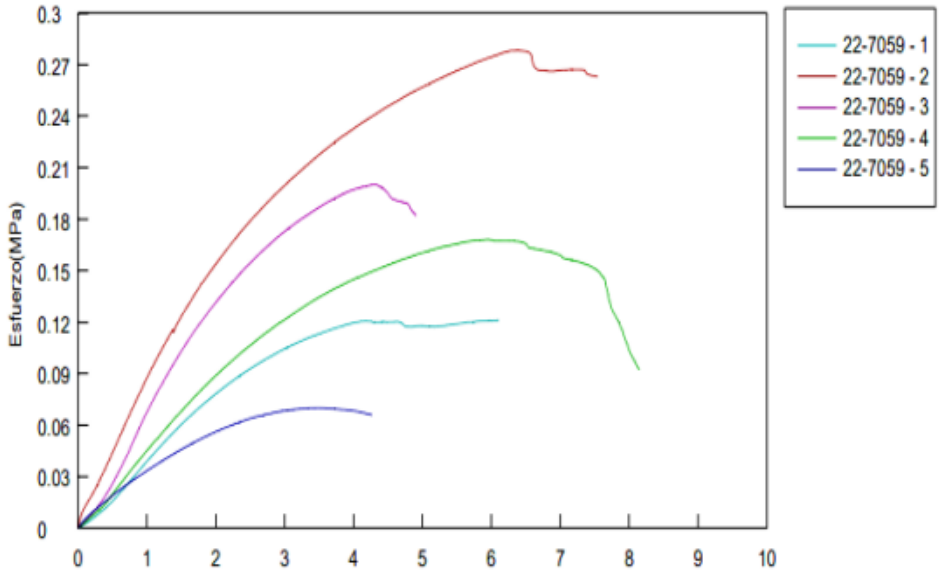


Nota: Ilustra el análisis de resistencia a la tracción aplicado a los empaques biodegradables, midiendo la fuerza máxima que pueden soportar antes de romperse.

Fuente: Adaptado datos aportados por Laboratorio de evaluación de materiales-Espol (2021).Unidades:N,newton;Mpa,megapascal; % ,porcentaje

Se determinó que el tratamiento solución en el análisis de resistencia se encuentran sujetas a las cargas de dinámicas con el máximo esfuerzo y deformación, ver en el Figura 7

Figura 7.
Resistencia a la tracción (deformación y máximo esfuerzo)



Nota: El gráfico muestra las curvas de esfuerzo-deformación para cinco muestras (22-7059-1 a 22-7059-5), indicando la resistencia mecánica del material evaluado. Se observa que la muestra 22-7059-2 alcanza el mayor esfuerzo (≈0.27 MPa), mientras que la 22-

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

7059-5 presenta la menor resistencia. La forma de las curvas sugiere diferencias en la capacidad de deformación antes de la falla, reflejando variabilidad en la estructura y comportamiento mecánico de cada muestra.

Fuente: Laboratorio de evaluación de materiales-Espol (2021). Unidades: Mpa,megapascal; % ,porcentaje

Discusión

A la formulación seleccionada se le aplicaron los análisis sensoriales, físicos y mecánicos correspondientes, obteniéndose los siguientes resultados:

De acuerdo con los aportes de (Lema & Manzo, 2021), en su estudio sobre la producción de bioplástico a partir de residuos de cacao con aplicación en envases para alimentos, se concluyó que el aroma característico de la materia prima se conserva durante el periodo de uso del producto. En concordancia, en la presente investigación se observó que el olor típico del cacao se mantiene por al menos 14 días, validando el comportamiento reportado por los autores.

En cuanto a la variable color, el tono café natural también mostró similitudes con los resultados obtenidos en dicho estudio, confirmando la estabilidad visual del material durante su periodo de evaluación.

Por otro lado, (Lema et al., 2020), en su trabajo titulado Diseño y elaboración de empaques artesanales a partir de subproductos de la industria del cacao, señalaron que el material presentaba una textura lisa. En el presente estudio, se obtuvo un comportamiento similar, aunque con una textura semi-lisa, lo cual puede atribuirse a diferencias en la proporción de aditivos o en el método de procesamiento utilizado.

Respecto a la biodegradabilidad, (Lema & Manzo, 2021), utilizando los métodos ASTM D-4102 y D-4871, reportaron un grado de descomposición del 6 %. En la presente investigación se obtuvo un resultado superior, alcanzando un 10,96 % de biodegradación, lo que evidencia una mayor eficiencia en el proceso de descomposición del material.

En relación con la dureza, (Díaz, 2017) en su investigación sobre la caracterización de bandejas biodegradables elaboradas a partir de maíz, papa, soya y glicerol mediante termo prensado, obtuvo un valor de 31,12 N. En contraste, el presente estudio alcanzó un valor inferior de 12 HD en la escala Shore D, lo cual puede estar relacionado con la naturaleza de los insumos utilizados y las condiciones de fabricación.

Finalmente, (Cuba A. et al., 2019) en su estudio sobre el desarrollo y caracterización de films biodegradables elaborados a partir de subproductos de cacao, reportaron una resistencia a la tracción de UTS = 0,6 ± 0,07 MPa para su mejor tratamiento. En

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

comparación, los resultados obtenidos en esta investigación fueron UTS = 0,167 MPa, con una carga máxima de 5,45 N y un porcentaje de deformación de 5,25 %, lo cual representa un comportamiento inferior, atribuible a las diferencias en composición, método de fabricación y condiciones experimentales.

Conclusiones

Se logró desarrollar un empaque biodegradable a partir de harina de cascarilla de cacao (Theobroma cacao L.), destinado al sector productivo artesanal, cumpliendo con parámetros aceptables en cuanto a propiedades físicas y mecánicas.

Durante la evaluación experimental, se determinó que las variables dureza y biodegradabilidad tuvieron un impacto directo en el estado y comportamiento del material. Se observó que, a partir del día 14, la lámina biodegradable comenzó a experimentar cambios significativos en sus propiedades físico-mecánicas, relacionados con la composición de la mezcla. En particular, se evidenció una mayor desintegración del material con el incremento de los porcentajes de glicerina (Gly) y carboximetilcelulosa (CMC), lo cual provocó un mayor deterioro estructural, indicando un equilibrio crítico entre flexibilidad y resistencia del biopolímero.

Tras aplicar un proceso de optimización estadística mediante el software Design Expert® versión 11, se identificó la formulación más adecuada para la línea de producción del empaque biodegradable. La solución óptima estuvo compuesta por:

Harina de cascarilla de cacao (A): 34,310 %, Carboximetilcelulosa (B): 17,000 % y Agua (C): 44,690 %. Esta combinación de insumos no solo permitió alcanzar un desempeño satisfactorio en términos de resistencia, textura y estabilidad sensorial, sino que además representó una alternativa rentable, con relación costo-beneficio favorable, adaptable a pequeñas y medianas unidades productivas artesanales.

El presente estudio evidencia el potencial de los subproductos agroindustriales como materia prima sostenible para el desarrollo de soluciones ecológicas en el ámbito del embalaje, alineadas con los principios de la economía circular.

Referencias bibliográficas

Andrade, G., & Castro, V. (2019). *Integrantes: Gisela Andrade Verónica Castro CRONOLOGIA DE LA EVOLUCION DEL CACAO HASTA EL CHOCOLATE*. https://cadenacacaoca.info/CDOC-

ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Deployment/documentos/Estrategias_internacionalizacion_vs_costos_transaccion_industria_chocolatera.pdf

Cuba A., Carbajal M.S., Collavino J., Cernaqué D.A., Carhuancho K.P., Guevara A., & Vargas L.F. (2019). *POSTER-FILM DE SUBPRODUCTOS DE CACAO*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12141.72161

Di Rienzo, J. A., Balzarini, M. G., & Robledo, C. W. (2008). *Manual del usuario InfoStat*. https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Casanoves/publication/319875343_Manual_del_usuario/links/5e2ee26992851c9af7280cfa/Manual-del-usuario.pdf

Díaz, C. X. J. (2017). *Caracterización y optimización de una bandeja biodegradable a partir maíz, papa, soya y glicerol por el método de termoprensado*. https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/ace03aaa-72a1-4fae-bcec-68ac432dde20/content

Gaitán, A. E. E., & Ropero, M. J. (2021). *PLANTEAMIENTO DE UN PROCESO PARA EL DESARROLLO DE PLATOS BIODEGRADABLES A BASE DE CASCARILLA DE CACAO EVA ELISA GAITÁN ALARCÓN-PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA*. https://repository.universidadean.edu.co/items/ac8e3cdf-811b-4974-849b-3fadbbce288a

Lema, V. A. E., & Manzo, E. N. S. (2021). *UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA*. https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/2eed30b4-598e-45ed-9df8-7c9b6f5389bc/content

Lema, V. E., Manzo, E. N., & Moreira, M. M. (2020). *Bioplásticos a partir de residuos del cacao, una alternativa para mitigar la contaminación por plástico*. https://www.researchgate.net/publication/353206609_Bioplasticos_a_partir_de_residuos_del_cacao_una_alternativa_para_mitigar_la_contaminacion_por_plastico_Bioplastics_from_cocoa_waste_an_alternative_to_mitigate_plastic_pollution

Morán, S. (2020). *Historias Sociedad*. https://planv.com.ec/historias/sociedad/nada-frena-plasticos-un-solo-uso-mas-260000-toneladas-al-ano-ecuador/#:~:text=Es

NTE INEN EN. (2013). *LISTADO-DE-NORMAS-INEN*. https://solsegsa.com/wp-content/uploads/2022/05/LISTADO-DE-NORMAS-INEN.pdf

PERSPECTIVA XXI
ISSN: 3103-151X
DOI: https://doi.org/10.70577/9wtace81

Sanmartín, R. G. S., Zhigue, L. R. A., & Alaña, C. T. P. (2017). *EL RECICLAJE: UN NICHO DE INNOVACIÓN Y EMPRENDIMIENTO CON ENFOQUE AMBIENTALISTA*. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202017000100005

Segura, D., Noguez, R., & Espín, G. (2020). *Contaminación ambiental y bacterias productoras de plásticos biodegradables*. https://www.academia.edu/38717730/Contaminación_ambiental_y_bacterias_productoras_de_plásticos_biodegradables

Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, *104*, 333–339. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039